Aus der Orthopädischen Klinik der Universität Düsseldorf
DIREKTOR: PROF. DR. K.-P. SCHULITZ

KRAFTFLUSSMESSUNGEN AN DER UNTEREN HALSWIRBELSÄULE (C_{3-7})

Eine experimentelle Studie mit Hilfe der Dehnungsmeßstreifen-Technik

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
Der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Norbert Kiedrowski

1981

1982

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41538105_0031

Aus der Orthopädischen Klinik der Universität Düsseldorf
DIREKTOR: PROF. DR. K.-P. SCHULITZ

KRAFTFLUSSMESSUNGEN AN DER UNTEREN HALSWIRBELSÄULE (C_{3-7})

Eine experimentelle Studie mit Hilfe der Dehnungsmeßstreifen-Technik

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
Der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Norbert Kiedrowski

1981

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Der Dekan
der Medizinischen Fakultät
der Universität Düsseldorf
gez.: Prof.Dr.M.Straßburg

Referent
gez.: Prof.Dr.K.-P.Schulitz

Korreferent
gez.: Prof.Dr.W.Weise

Seite

1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG 1

2. ALLGEMEINER TEIL 2

2.1. Anatomie 2
2.2. Pathologische Anatomie 7
2.3. Biomechanik 9

3. SPEZIELLER TEIL 15

3.1. Material und Methode 15
3.2. Meßergebnisse 21
3.2.1. Messungen bei Bewegungen in der Sagittalebene 21
3.2.2. Messungen bei Bewegungen in der Frontal- und Horizontalebene 24
3.2.3. Messungen bei komplexen Bewegungen 26
3.2.4. Messungen bei axialer Belastung 29
3.2.5. Messungen im quantitativen, segmentalen Vergleich 30

4. DISKUSSION 32

5. ZUSAMMENFASSUNG 37

6. LITERATURVERZEICHNIS 40

1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG

Nach HULT (1954) leiden ca. 70 % der Bevölkerung irgendwann einmal unter Beschwerden im Bereich der Halswirbelsäule. Die ausgeprägte Funktion der Halswirbelsäule wird im allgemeinen dafür verantwortlich gemacht, daß hier die degenerativen Erscheinungen früher auftreten als an der Lendenwirbelsäule, bei der eine höhere statische Belastung und eine geringere Beweglichkeit vorliegen.

Über die Lendenwirbelsäule, die Funktion und das Manifestationsmuster der Degenerationserscheinungen gibt es - im Gegensatz zur Halswirbelsäule - eine Vielzahl von Veröffentlichungen. So steht für die Lendenwirbelsäule fest, daß Entstehung und Lokalisation der degenerativen Veränderungen im Bewegungssegment wesentlich von der Stellung der Wirbelbogengelenke abhängen (NIETHARD 1978).

Diese Zusammenhänge wurden an der Halswirbelsäule bislang nicht untersucht. Die nur an der unteren Halswirbelsäule vorkommenden Processus uncinati und die spezifische Stellung der Wirbelbogengelenke lassen ein von der Lendenwirbelsäule verschiedenes Funktionsmuster erwarten.
Neben den Processus uncinati sind die horizontalen Bandscheibenspalten als zweite morphologische Eigenart mögliche Hinweise für unterschiedliche funktionelle Belastungen der einzelnen Wirbelanteile.

Im Rahmen dieser Untersuchung soll deshalb der Frage nachgegangen werden, wie die einzelnen Wirbelanteile bei den verschiedenen Funktionen belastet werden.

2. ALLGEMEINER TEIL

2.1. Anatomie

Die menschliche Halswirbelsäule besteht aus sieben Wirbeln, die mit Ausnahme der beiden obersten durch Bandscheiben - Disci intervertebrales - miteinander verbunden sind. Der eigentliche Halswirbeltyp wird nur von den unteren Halswirbeln C_{3-7} dargestellt, während die Halswirbel 1 und 2 - Atlas und Axis - entwicklungsgeschichtlich, morphologisch und funktionell die Ausnahme darstellen. Dementsprechend unterscheidet man eine obere und untere Halswirbelsäule.

Der einzelne Halswirbel läßt sich unterteilen in: Wirbelkörper, Wirbelbogen, Dornfortsatz, Querfortsätze und Gelenkfortsätze.

Der Wirbelkörper - Corpus - ähnelt einem "Pyramidenstumpf" (BARDELEBEN 1896), dessen craniale Deckplatte an den Seiten zwei senkrecht stehende Knochenleisten aufweist, die TROLARD (1893) "Processus uncinati" nannte. Diese Hakenfortsätze stellen neben den horizontalen Bandscheibenspalten eine cervicale morphologische Besonderheit dar.

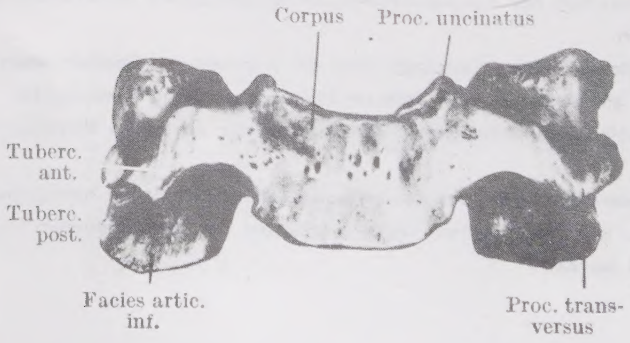

Abbildung 1: Vorderansicht eines Halswirbels (EXNER 1954)

Postero-lateral am Wirbelkörper setzt der Wirbelbogen - Arcus - an und umgibt das Foramen vertebrale. Die dorsale Verlängerung des Wirbelbogens ist der nach hinten-unten ausgerichtete Dornfortsatz - Processus spinosus -.

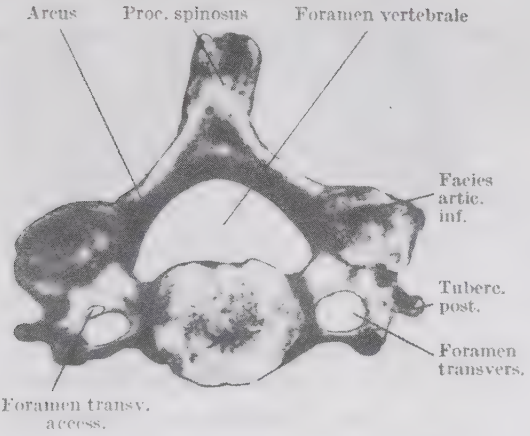

Abbildung 2: Caudale Ansicht eines Halswirbels (EXNER 1954)

Die Wirbelbogenwurzeln haben cranial und caudal eine Einsattelung - Incisurae vertebrales superior et inferior -. Die Incisura vertebralis inferior und die Incisura vertebralis superior des nächst tieferen Halswirbels bilden das Foramen intervertebrale.

Die Querfortsätze - Processus transversii - gehen seitlich aus der Wirbelbogenwurzel hervor. Sie bestehen aus dem vorderen Processus costarius und dem hinteren Processus transversus und weisen in der Mitte ein ovales Loch auf - Foramen transversarium -.

Die Gelenkfortsätze - Processus articularia superior et inferior - gehen direkt hinter dem Processus transversus aus dem Wirbelbogen hervor.

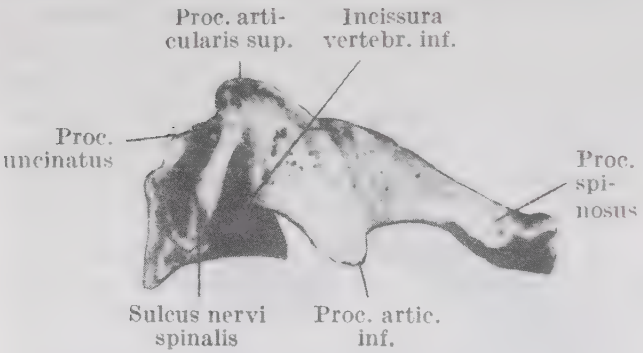

Abbildung 3: Lateralansicht eines Halswirbels von links (EXNER 1954)

Die Stellung der cervicalen Wirbelbogengelenkflächen ist unterschiedlich Die Wirbelbogengelenkflächen insgesamt lassen sich mit den Brettern einer "Jalousie" (EXNER 1954) vergleichen, wobei die Jalousiestellung an den einzelnen Halswirbeln verschieden ist und so die unterschiedliche sagittalflexorische Beweglichkeit in den Bewegungssegmenten bedingt.
Die Wirbelbogengelenke bestehen aus der unteren Gelenkfläche eines Wirbelbogens und der oberen Gelenkfläche des nächst tieferen Wirbelbogens. Die Gelenkflächen sind mit hyalinem Knorpel überzogen. Die Gelenkkapsel besteht aus Fettgewebe und lockerem Bindegewebe. In den Gelenkspalt reicht lappenförmig das Fettgewebe und Bindegewebe mit Blutgefäßen.

Die Bandscheibe - Discus intervertebralis - ist das spezifische Bindeelement der gesamten Wirbelsäule. Die fünf Zwischenwirbelscheiben der unteren Halswirbelsäule sind nicht nur formbestimmend für die

Halswirbelsäule, sondern beeinflussen auch ihre Haltung und Länge (BOWDEN 1965).
Die Bandscheibe hat als äußeren Ring den Anulus fibrosus bestehend aus konzentrisch angeordneten Faserknorpelzügen. Obere und untere Begrenzung ist je eine hyaline Knorpelplatte, die mit dem jeweiligen Wirbelkörper fest verbunden ist. Das Zentrum der Bandscheibe ist der Gallertkern - Nucleus pulposus -.
Die cervicalen Bandscheiben zeigen gegenüber denjenigen der Brust- und Lendenwirbelsäule eine Besonderheit: Sie haben horizontale Spalten, die sich in den ersten Lebensjahren ausbilden (TÖNDURY 1947).

An der Halswirbelsäule werden kurze und lange Bänder unterschieden:

Die langen Bänder - Ligamenta longitudinale anterius et posterius - überziehen alle Wirbelkörper.
Das Ligamentum longitudinale anterius enthält nur wenige elastische Fasern und ist im Bereich der Halswirbelsäule am schwächsten ausgebildet. Es ist an der Vorderfläche der Wirbelkörper fest mit dem Periost verbunden, so daß Bandscheibe und Ränder der Wirbelkörper praktisch überbrückt werden. Das vordere Längsband verhindert eine extreme Verlagerung des Nucleus pulposus bei der Extension (STOFFT 1970).

Das Ligamentum longitudinale posterius ist elastischer, dicker und fester als das vordere Längsband. Es verläuft an der dorsalen Wirbelkörperseite und besteht aus mehreren Schichten. Die oberflächlichen Schichten überspringen jeweils vier bis fünf Wirbelkörper, während die tieferen von Bandscheibe zu Bandscheibe ziehen, wo sie innige Verbindung zum Anulus fibrosus haben.
Nach FICK (1904) hat das hintere Längsband die Aufgabe, die Vv. basivertebrales zu schützen. Eine statische Funktion stellte STOFFT (1970) in Frage.

Die kurzen Bänder werden in vier Arten nach ihrem Sitz und nach ihrer Zugrichtung unterteilt:

Bogenbänder - Ligamenta intercruralia bzw. Ligamenta flava -
Zwischenquerfortsatzbänder - Ligamenta intertransversaria -
Zwischendornbänder - Ligamenta interspinalia -
Spitzenbänder - Ligamenta supraspinales -

Die Bogenbänder verlaufen parallel zu den Wirbelbögen und überlappen sich "dachziegelartig" (EXNER 1954). Sie bestehen vorwiegend aus längsgerichteten elastischen Fasern. Das Ligamentum flavum wird besonders bei der Ventralflexion und bei der Torsion beansprucht (STOFFT 1970).

Die Zwischenquerfortsatzbänder sind an der Halswirbelsäule kaum entwickelt.

Die Zwischendornbänder haben im Halsteil der Wirbelsäule eine besondere Funktion, da sie ins Nackenband - Ligamentum nuchae - ausstrahlen. An den Dornfortsatzwurzeln spalten sich die Zwischendornbänder und ziehen zwischen den Bögen zur Gelenkkapsel der Intervertebralgelenke. Nach JIROUT (1972) sind die Zwischendornbänder an der Zügelung der Beugung und an der Rotationsübermittlung beteiligt.

Das Spitzenband hat ebenfalls im Halsteil besondere Bedeutung, da es sich hier zum Ligamentum nuchae entwickelt und kräftige Verstärkungszüge von den Dornfortsätzen erhält. Es ist stark mit elastischen Fasern durchsetzt und hat die Aufgabe, die Sagittalflexion des Kopfes und Halses zu bremsen (JUNGHANNS 1979).

2.2. Pathologische Anatomie

Die degenerativen Veränderungen der Halswirbelsäule sind in erster Linie statisch bedingte Verschleißvorgänge und ein Tribut für den aufrechten Gang des Menschen (REISCHAUER 1949). Ab dem 30. Lebensjahr sind an der Halswirbelsäule regelmäßig Degenerationen zu erwarten, die mit fortschreitendem Alter zunehmen. Nach Auffassung von ECKLIN (1960) sind die degenerativen Veränderungen als Anpassung an die besonderen Funktionen der Halswirbelsäule aufzufassen.

Alle degenerativen Prozesse nehmen nach EXNER (1954) ihren Anfang an den hochdifferenzierten Bandscheiben, wobei es dann zu einem verhängnisvollen Kreislauf kommt:
Bandscheibe - Wirbel - Zwischenwirbelgelenk - Bandscheibe.

Während Osteochondrosen und Spondylosen seltener vorkommen, überwiegen nach AUFDERMAUR (1960) die Uncovertebralarthrosen und die Intervertebralarthrosen im oberen Abschnitt der unteren Halswirbelsäule.

So geht die Bandscheibenzermürbung mit der Sklerose der Wirbelkörperplatten und der Bildung von Randzacken (AUFDERMAUR 1960) einher - Osteochondrose -.

Ebenfalls durch den Bandscheibenverschleiß - wie Lockerung, Rißbildung und Prolaps der Bandscheibe - kommt es am Wirbelkörper zu einem reaktiven Umbau: die Spondylosis deformans. Hierbei handelt es sich nach JUNGHANNS (1977) um eine degenerative Erscheinung, deren Ursprung die Abtrennung des Faserringes der Bandscheibe von der Wirbelkörperrandleiste ist. Die Reizantwort ist eine knorpelige Wucherung, die später verknöchert.

Das häufige Auftreten der Uncovertebralarthrosen führt FENLIN (1971) auf die Bewegungsfreiheit der Segmente zurück. AUFDERMAUR (1960) macht funktionsmechanische Überbelastungen dafür verantwortlich, daß es bedingt durch die degenerative Höhenabnahme der Bandscheiben zu Kontakt der angrenzenden Wirbel im Bereich der Processus uncinati kommen kann.

Das Segment $C_{5/6}$ wird zentral von der Schwerelinie der Halswirbelsäule getroffen und ist folglich besonders stark statisch belastet (EXNER 1954). Dementsprechend beginnen hier relativ früh durch chondrotisch bedingte Höhenminderung des Zwischenwirbelabschnittes die besagten Abstützungsvorgänge der benachbarten Wirbel (BAILEY 1963).

Durch die degenerationsbedingte Höhenminderung der Bandscheibe kommt es an den Gelenkfortsätzen zu gegenseitigen Verkippungen und Verkantungen mit vermehrtem Knorpelverschleiß und reaktiven Randwucherungen - Intervertebralarthrosen -.
Besonders betroffen sind die oberen Gelenkfortsätze, da sie sich nach ventral umbiegen. Die dabei an ihrer oberen Kante entwickelten Verdickungen und Wülste können hakenförmig gegen die Foramina intervertebralia vorspringen und einengend wirken (DUUS 1948).
Bei stark ausgeprägter Spondylarthrosis deformans zeigen auch die seitlichen Gelenkränder Randwülste, wobei im Spätzustand Sklerose der Spongiosa, knöcherne Randzacken und Gelenkblockierungen auftreten können (ZUKSCHWERDT und MITARBEITER 1960).

Im Extremfall kann es durch ausgeprägten Bandscheibenschaden in der betroffenen Cervicalregion von der normalen lordotischen zu einer gestreckten oder sogar kyphotischen Haltung kommen (AUFDERMAUR 1960).

2.3. Biomechanik

Die Halswirbelsäule ist der beweglichste Teil des Rumpfskeletts. Nach BÄRTSCHI-ROCHAIX (1949) ist sie gewissermaßen die fünfte Extremität. Verglichen mit der gesamten Wirbelsäule hat die Halswirbelsäule die geringste Last zu tragen. Dementsprechend sind die Halswirbel die grazilsten Wirbel und die Dornfortsätze relativ schwach. Die grazile Form und die geringe statische Belastung bedingen die relativ große Beweglichkeit der Halswirbelsäule (EXNER 1954).

R. FICK (1904) vergleicht die Halswirbelsäule mit einer "nach vorn gebauchten Feder", deren Belastung durch das Kopfgewicht und den Tonus der Hals- und Nackenmuskulatur gegeben ist.

Auf den Wirbelbogengelenken ruht nach EXNER (1954) vom Atlas bis zum fünften Halswirbel die Hauptlast.
Die Halswirbelsäule verdankt ihre "ausgezeichnete Bewegungsmöglichkeit" nach AUFDERMAUR (1960) vor allem der Stellung der Gelenke. Demgegenüber kommt DITTMAR (1930) aufgrund von Röntgenuntersuchungen zu dem Schluß, daß die Wirbelbogengelenke nur eine Hemmfunktion besitzen und die Bewegungen der Wirbelsäule begrenzen. Es gibt noch viele Ansichten über die Wirbelbogengelenke, so werden sie von FICK (1904) als "straffe Wackelgelenke", von VIRCHOW (1928) und KELLER (1958) als "Gelenke mit wesentlicher Schienenfunktion", von GUNTZ (1934) als "typische Schlottergelenke" und von SIMON (1951), SCHENK (1963), FIELDING (1964), BOWDEN (1966) und TUNDURY (1968) als "Gelenke mit Führungs- und Hemmungsfunktion" bezeichnet.
Nach WHITE und PANJABI (1978) haben die Wirbelbogengelenke die Aufgabe, die Wirbelsäulenbewegungen zu steuern, wobei die unterschiedlichen Stellungen der Facetten in den einzelnen Halswirbelsäulenabschnitten entsprechende Bewegungsmöglichkeiten bedingen.

Nach SCHMORL und JUNGHANNS (1932) bestimmen die Wirbelbogengelenke im Verbund mit den "Halbgelenken Zwischenwirbelscheibe" und der Bandscheibe die Haltung und Funktion der Wirbelsäule.

Dies belegen auch Versuche, die JUNGHANNS (1978) beschreibt: Eine deutlich erhöhte Beweglichkeit der Wirbelgelenke ergibt sich, wenn die dazugehörige Bandscheibe horizontal durchgetrennt wird. Dementsprechend kommt der Bandscheibe auch eine bedeutende Rolle zu. BEDBROOK und EDIBAUM stellten 1973 fest, daß die Festigkeit der Bandscheibenhaft in Kombination mit den Längsbändern entscheidend für die Stabilität der Halswirbelsäule ist.

Die Uncovertebralgelenke haben nach LIECHTI (1948) neben statischen Funktionen auch Einfluß auf die Nickbewegungen. Die Funktion einer Barriere, die ein seitliches Abgleiten der Wirbelkörper verhindert, spricht SCHENK (1963) den Processus uncinati zu. WHITE und PANJABI (1978) meinen dagegen, daß die Uncovertebralgelenke die Verschiebung der Wirbelkörper nach hinten unter Extension verhindern und die Rotation und Seitneigung begrenzen.

Die Bänder der Halswirbelsäule haben neben Haltefunktionen ganz wesentliche steuernde und bremsende Funktionen gegenüber unphysiologischen Bewegungen. Diesen Funktionen tragen die Bänder durch ihren geschichteten und gerichteten Verlauf Rechnung (EXNER 1954).
Eine bedeutende Rolle spielt der Anteil an elastischen Fasern für die flexionshemmenden gelben Bänder (BEDBROOK 1969, JUNGHANNS 1979). JIROUT (1972) stellt fest, daß die Interspinalbänder auch die Beugung hemmen und eine Funktion bei der Rotation haben.
Die Bedeutung der ligamentären Verspannungen konnten auch PERRY und NICKEL (1959) aufzeigen: Sie beobachteten bei einem Patienten mit kompletter Paralyse der Halsmuskulatur keinerlei Anzeichen von Instabilität der einzelnen cervicalen Bewegungssegmente.

Die Bewegungen der Halswirbelsäule sind grundsätzlich in drei Ebenen möglich:

in der sagittalen Ebene die Flexion und Extension,
in der frontalen Ebene wesentlich geringere Seitneigungen und
in der horizontalen Ebene die Rotationen.

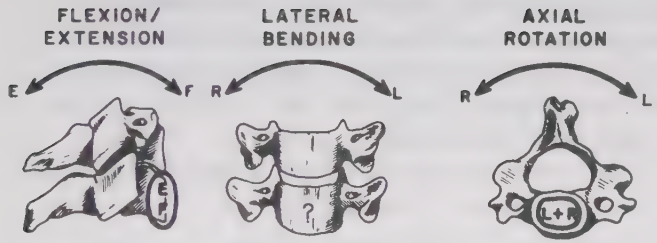

Abbildung 4: Die grundsätzlichen Bewegungsmöglichkeiten der Halswirbelsäule mit Lokalisation der Bewegungszentren (EF und LR). (WHITE und PANJABI 1978)

In der sagittalen Ebene hat die menschliche Halswirbelsäule nach EXNER (1954) eine Beweglichkeit von ca. 95^{o} zwischen extremer Flexion und Reklination.
Bei der sagittal-flexorischen Bewegung zwischen zwei Halswirbeln liegt nach RIZZI und COVELLI (1976) eine Verschiebung des Drehpunktes in den unteren Basiswirbelkörper vor, so daß der Bewegungsmodus einer Translation vorherrscht neben der Rotation.

Bei der Reklination nehmen die Wirbel wie bei der Flexion eine "physiologische Subluxationsstellung" (EXNER 1954) ein, nur erfolgt die Verschiebung der Wirbel natürlich umgekehrt. Das hintere und vordere Längsband begünstigen diesen Bewegungsmechanismus, da ventral die Wirbelkörper und dorsal die Bandscheiben durch die Bänder miteinander verbunden sind.

Die "Hauptbewegungsrichtung im Sinner der Flexion und Extension" ist nach EXNER (1954) durch die Processus uncinati der unteren Halswirbelsäule vorgezeichnet.
Die Wirbelbogengelenke gleiten bei extremer Flexion aneinander vorbei und ihre Gelenkflächen decken sich etwa nur noch zur Hälfte, dorsal klafft der Gelenkspalt ein wenig (FIELDING 1957). Bei maximaler Reklination decken sich dagegen die Gelenkflächen besser. Die oberen Gelenkflächen werden gegenüber den unteren kaum nach dorsal verschoben. Jetzt klafft der Gelenkspalt ventral und dorsal liegen die Gelenkflächen aneinander.
Die Dornfortsätze klaffen bei extremer Flexion erheblich, während sie sich bei starker Reklination einander nähern.

Die Bewegungsachse für die Sagittalbewegung liegt nach Untersuchungen von FICK (1911) im Zentrum des jeweiligen Wirbelkörpers, nach DITTMAR (1930) und EXNER (1954) in der Bandscheibe selbst, wobei EXNER sogar die Auffassung vertritt, daß die Achse während der Sagittalbewegung innerhalb der Bandscheibe wandert.
PENNING (1968) vermutete das Bewegungszentrum mehr im anteriocranialen Bereich des Wirbelkörpers. Anhand von experimentellen Bewegungsstudien kam LYSELL (1969) zu dem Schluß, daß das Bewegungszentrum im darunterliegenden Wirbelkörper liegen müsse. Zu gleichen Ergebnissen kamen RIZZI und COVELLI (1976) mit der Konstruktion von Momentanpollagen am Röntgenbild, wobei sie die Ansicht vertreten, daß die Position des Bewegungszentrums innerhalb der Wirbelkörper von Segment zu Segment wechselt. Als Folge aus dieser Erkenntnis ergibt sich, daß bei der Sagittalbewegung die benachbarten Wirbel eines Segmentes sich gegeneinander verschieben. Dabei "reitet" (SCHANZ 1931) der cranial gelegene Wirbel auf dem "Nucleus pulposus als Wasserkissen".

In der frontalen Ebene sind nach Untersuchungen von BAKKE (1931) Bewegungen von ca. 25,9° nach jeder Seite möglich, wobei die Beweglichkeit in den cranialen Abschnitten der unteren Halswirbelsäule am größten ist.
Eine reine Seitwärtsbewegung der Halswirbelsäule gibt es jedoch nicht.

Immer ist mit der Seitneigung eine konkavseitige Rotation verbunden, wobei der Dornfortsatz zur konvexen Seite gleitet (BAKKE 1931).
Dieses seitliche Kippungsverhalten bezeichnet EXNER (1954) als Torsion.
Das Bewegungszentrum bei der Seitneigung liegt nach LYSELL (1969) ventral der Gelenkfortsätze, wobei er sich auf die oben erwähnte Aussage von BAKKE stützt.

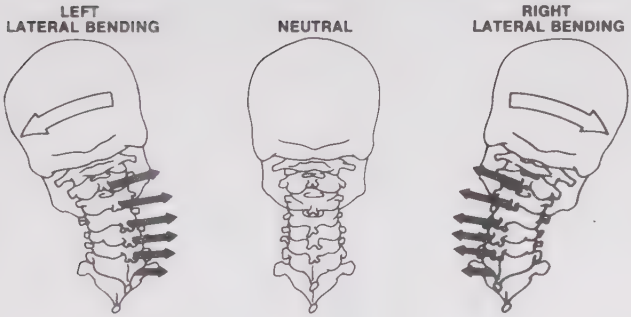

Abbildung 5: Die Bewegung der Dornfortsätze zur konvexen Seite bei der Seitneigung (WHITE und PANJABI 1978)

In der horizontalen Ebene beträgt die Drehung der Halswirbelsäule nach Untersuchungen von EXNER (1954) 80 - 85° für jede Seite.

Die Rotation erfolgt fast ausschließlich - zu zwei Dritteln - im unteren Kopfgelenk (LIECHTI 1948, HINZ und ERDMANN 1967).

Die Rotation ist von cranial nach caudal im Bereich der unteren Halswirbelsäule immer geringer möglich, während die Seitneigung nach caudal zu noch gut möglich ist (LYSELL 1969).

Auch VIRCHOW (1928) belegte anhand von Röntgenbildstudien, daß in den cranialen Abschnitten der Halswirbelsäule Bewegungen in allein drei Ebenen möglich sind, während in den caudalen Abschnitten neben der Sagittalbewegung mehr die Seitneigung möglich ist.

3. SPEZIELLER TEIL

3.1. Material und Methode

Für die vorliegende Arbeit wurden zwölf Kapsel-Band-Präparate bestehend aus einem Teil der Schädelbasis, der gesamten Halswirbelsäule und mindestens fünf Brustwirbeln untersucht.
Die frisch entnommenen Halswirbelsäulen wurden umgehend präpariert, mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) beklebt und vermessen. Verwendet wurden dazu von der Firma KYOWA die DMS: KFC-1-C1-11 und der Spezialkleber: CC-15 a.
Insgesamt wurden pro Wirbelkörper jeweils fünf Dehnungsmeßstreifen auf folgende vom Periost befreite Corticalisstellen geklebt:

1. auf die Wirbelkörpervorderfläche (WK)
2. auf beide Uncovertebralgelenke (UVG)
3. auf beide Interarticularportionen (IAP)

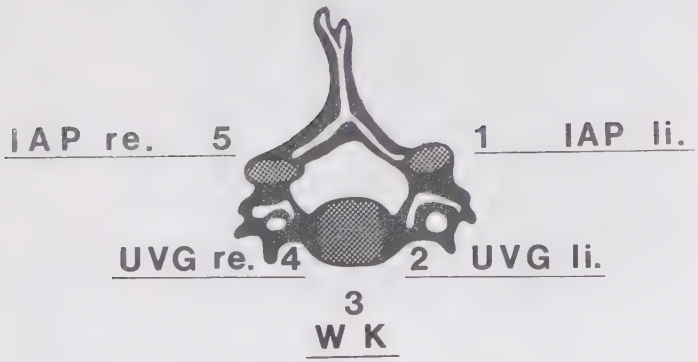

Abbildung 6: Die Position der fünf Dehnungsmeßstreifen am Wirbelkörper

Die Dehnungsmeßstreifen (DMS) bestehen aus einer dünnen aufzuklebenden Trägerfolie mit einem eingelassenen Metallgitter. Das unter elektrische Spannung setzbare Metallgitter erfährt durch Oberflächenveränderungen des Meßobjektes eine Verlängerung oder Verkürzung, was nach einfachen physikalischen Grundsätzen zu einer elektrischen Widerstandsänderung führt. Der Dehnungsmeßstreifen wird innerhalb der Meßanordnung in eine WHEATSTONE'SCHE Brücke integriert, da diese am besten geeignet ist, um derartige Messungen auszuführen. Die Speisespannung U_E des DMS wird nun während des Versuches durch die elektrische Widerstandsänderung verändert. Dadurch wird die vorher abgeglichene WHEATSTONE'SCHE Brückenschaltung verstimmt. An den Ausgangsklemmen der Brücke entsteht dabei eine elektrische Spannung U_A. Der Relativwert $U_{A/E}$ ist der relativen Widerstandsänderung und damit der Meßgröße "Dehnung" proportional (HOFFMANN 1978).
Die relative Ausgangsspannung wird in einem nachgeschalteten Meßverstärker verstärkt und mit Hilfe eines Lichtstrahlschreibers registriert.

Mit der DMS-Methode kann nur qualitativ gemessen werden; quantitative Messungen sind nur im direkten Vergleich möglich, jedoch ohne damit Absolutbelastungen angeben zu können.

Für die Versuche wurde eigens ein Versuchsrahmen entwickelt, der es ermöglicht, alle in vivo vorkommenden Bewegungen nachzuahmen. Hierzu sind Kugelgelenke erforderlich, die die Drehung, Seitneigung, Flexion und Extension der Präparate erlauben. Um die einzelnen Bewegungsausmaße jederzeit reproduzieren zu können, sind spezielle Teleskope mit Skalen für die Sagittal- und Frontalbewegungen eingebaut. Für Stauchungsversuche ist im unteren Bereich der Apparatur eine Kraftaufnehmerdose installiert, so daß die Präparate mit genau dosierbaren und reproduzierbaren Kräften gestaucht werden können.

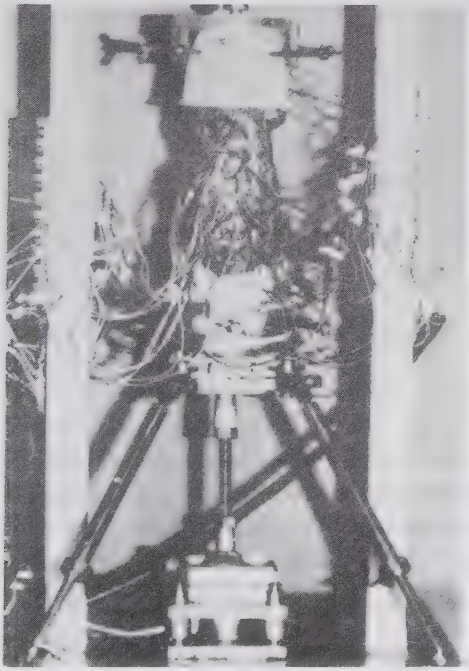

Abbildung 7: Die zur Vermessung fertige Halswirbelsäule eingespannt in den Versuchsrahmen. In der Bildmitte unten die Kraftaufnehmerdose, darüber das untere Kugelgelenk. Eine Gewindestange stellt die Verbindung zum oberen Kugelgelenk her. Hier setzen seitlich die nach vorne unten verlaufenden Teleskope mit Skaleneinteilung an.

Die Reproduzierbarkeit bei Rotationsbewegungen ist durch eine kreisrunde Arretierungsmöglichkeit im oberen Teil der Apparatur gewährleistet.

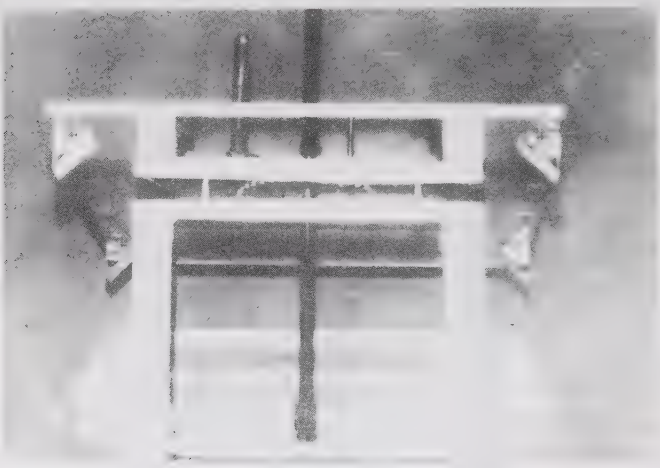

Abbildung 8: Im oberen Teil der Apparatur sind eine Vielzahl von Einstellmöglichkeiten in Form eines Kreises angebracht

Um den DMS an der Wirbelkörpervorderfläche (WK) postieren zu können, muß das Ligamentum longitudinale anterior vorsichtig in der Weise abpräpariert werden, daß die Bandverbindung zweier benachbarter Wirbelkörper nicht gefährdet wird.

Nachdem die zu untersuchende Halswirbelsäule sorgfältig präpariert ist, wird sie in besonderen Plastikdosen jeweils am caudalen und cranialen Ende mit einem Spezialgips befestigt.
Anschließend wird ein Steinmannagel in sagittaler Richtung durch den Dens axis eingebracht. Mit Hilfe des Steinmannagels werden Drehungen ausgeführt, wobei durch entsprechende Feststellmöglichkeiten eines Drehstabes die Rotation jederzeit reproduzierbar ist (siehe Abb. 8).

Dann werden die DMS auf die entsprechenden Wirbelstrukturen geklebt und über spezielle Lötstationen mit Hilfe von zu lötenden Kabelverbindungen an die Meßverstärkereinrichtung angeschlossen.

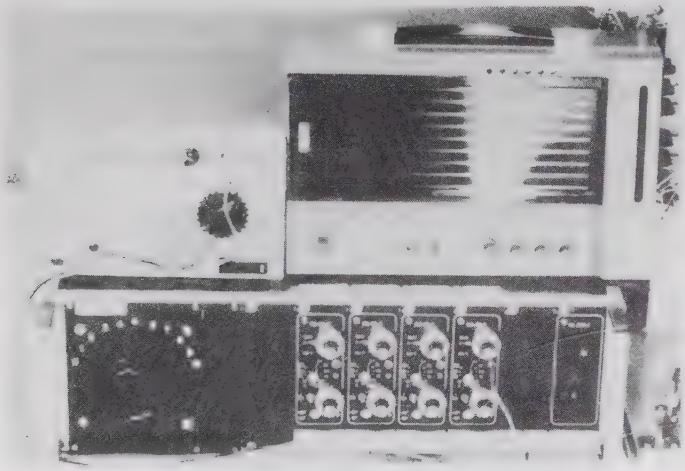

Abbildung 9: Links oben auf dem Mehrfachumschaltgerät (Firma DIGILOG) ist das elektrische Meßgerät zum Abgleichen der WHEATSTONE'SCHEN Brücke zu sehen. Daneben der Sechskanal-Lichtstrahlschreiber (Firma KYOWA). Darunter im selben Gehäuse mit dem Mehrfachumschaltgerät die vier Meßverstärker (Firma KYOWA)

Nach Festlegung entspricht ein Ausschlag des Lichtkanalschreibers nach oben einer Stauchung und nach unten einer Dehnung.

Um die Vordehnung der DMS - bedingt durch die nicht immer plane Oberfläche der Corticalis - kompensieren zu können, wird eigens eine zusätzliche Nullpunkt-Brückenschaltung mit einem leicht regelbaren Potentiometer benutzt.
Mit Hilfe des Mehrfachumschaltgerätes für 40 DMS-Positionen (Firma DIGILOG) werden die DMS über vier Meßverstärker (Firma KYOWA CD-90/E) an den Sechskanal-Lichtstrahlschreiber (Firma KYOWA) angeschlossen. Simultan zu den ausgeführten Funktionsbewegungen der Halswirbelsäule werden dann die den Belastungen entsprechenden Bewegungsauslenkungen registriert. Wegen der schlechten fototechnischen Reproduzierbarkeit wurden die Meßkurven im Maßstab 1:1 auf Millimeterpapier umgezeichnet.

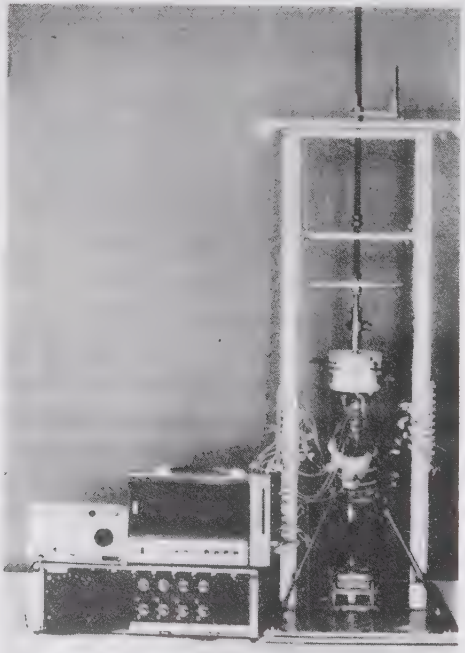

Abbildung 10: Die Versuchsapparatur mit fertiger eingespannter Halswirbelsäule und der Messverstärkereinrichtung. Seitlich in Höhe des Präparates sind am Versuchsrahmen die Nullpunkt-Brückenschaltungen befestigt (siehe auch Abb. 7)

3.2. Meßergebnisse

3.2.1. Messungen in der Sagittalebene

Bei den Messungen der Bewegungen in der Sagittalebene zeigt sich ein stets gleiches Verhalten:
Während die Interarticularportionen gedehnt werden, zeigen die Uncovertebralgelenke (UVG) und die Wirbelkörpervorderflächen (WK) bei der Flexion Stauchungen.

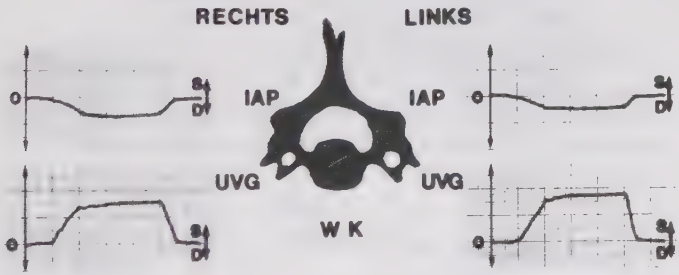

Abbildung 11: Bei der Flexion werden die Interarticularportionen beiderseits gedehnt und die Uncovertebralgelenke auf beiden Seiten gestaucht

Wirbelkörper C3-Th2

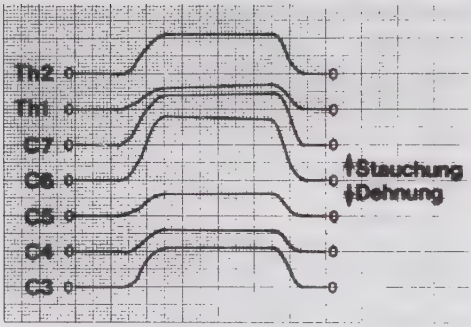

Abbildung 12: Die Wirbelkörpervorderflächen zeigen bei Flexion eine Stauchung

Bei der Extension zeigt sich im Verhältnis zur Flexion ein spiegelbildliches Verhalten der Belastungsmuster:
Die Interarticularportionen werden gestaucht, während die Uncovertebralgelenke und die Wirbelkörpervorderflächen gedehnt werden.

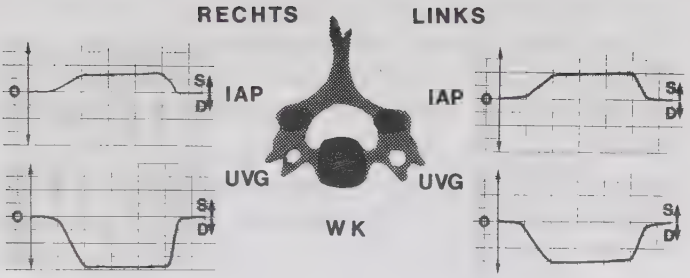

Abbildung 13: Unter Extension zeigt sich das spiegelbildliche Belastungsmuster der Flexion. Die Interarticularportionen werden gestaucht und die Uncovertebralgelenke gedehnt

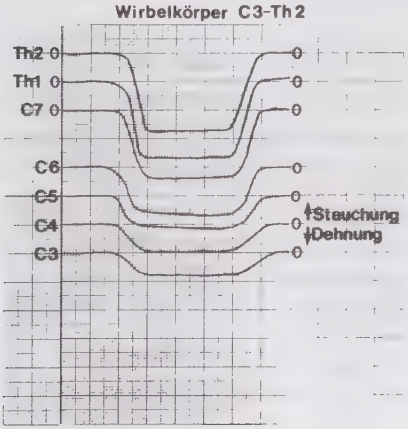

Abbildung 14: Die Wirbelkörper werden unter Extension gedehnt

3.2.2. Messungen in der Frontal- und Horizontalebene

Unter der Seitneigung und der Drehung zeigen sich nicht so gleichmäßige Ergebnisse wie in der Sagittalebene. An den Interarticularportionen, den Uncovertebralgelenken und den Wirbelkörpervorderflächen lassen sich sowohl bei Seitneigungen als auch bei den Rotationen immer wieder seitengleiche Kraftflüsse nachweisen.

Bei der Seitneigung oder Rotation werden die konkavseitigen Interarticularportionen stets gestaucht, während sich auf der konvexen Seite Dehnungen zeigen. Die konkavseitigen Uncovertebralgelenke werden ebenfalls gestaucht und auf der konvexen Seite treten Dehnungen auf. Die Wirbelkörpervorderflächen werden gestaucht.

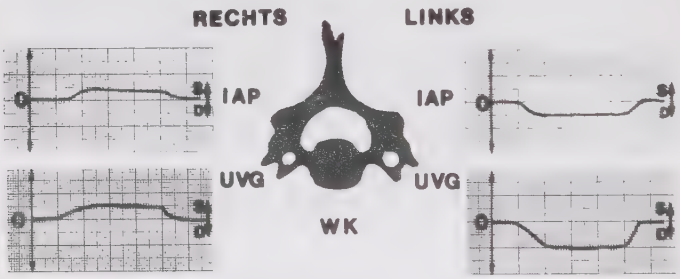

Abbildung 15: Bei der Rotation nach rechts werden die rechte Interarticularportion und das rechte Uncovertebralgelenk gestaucht, während auf der linken Seite die Interarticularportion und das Uncovertebralgelenk gedehnt werden

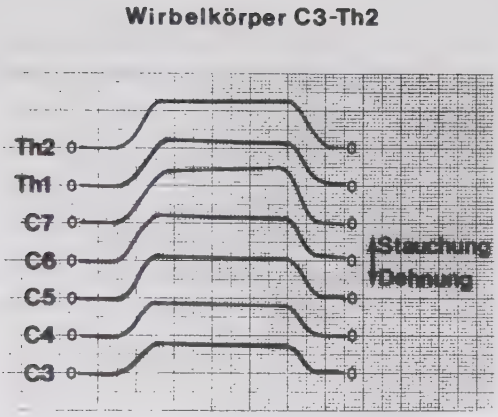

Abbildung 16: Die Wirbelkörpervorderflächen zeigen bei der Rotation nach rechts eine Stauchung

Bei der Seitneigung oder Rotation nach links zeigen sich für die Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke spiegelbildliche Ergebnisse:
Die Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke auf der linken Seite werden gestaucht und auf der rechten Seite gedehnt. Der Wirbelkörper wird allerdings wie bei der Rotation nach rechts gestaucht.

3.2.3. Messungen bei komplexen Bewegungen

Für die komplexen Bewegungen ist kennzeichnend, daß die Belastungsänderungen durch die zusätzlichen Bewegungen in der frontalen oder in der horizontalen Ebene beeinflußt bzw. charakteristisch verändert werden. Dies gilt für alle fünf segmentalen DMS-Positionen.

Bei der Kombination von Extension mit anschließender Seitneigung oder Rotation zeigen sich als erstes die bekannten Muster, die dann durch die zusätzlichen Bewegungen in der frontalen bzw. horizontalen Ebene modifiziert werden:
So werden die Interarticularportionen zunächst gestaucht, die Uncovertebralgelenke und die Wirbelkörpervorderflächen entsprechend gedehnt. Bei zusätzlicher Rotation z.B. nach rechts wird auf die Stauchung der konvexseitigen linken Interarticularportion und auf die schon vorliegende Dehnung des konvexen Uncovertebralgelenkes eine Dehnung aufgepflanzt. Dabei kommt es an der linken Interarticularportion zum vollständigen Lastwechsel, so daß nun eine Dehnung vorliegt.
Auf der konkaven rechten Seite wird die vorgestauchte Interarticularportion noch stärker gestaucht und das vorgedehnte Uncovertebralgelenk erfährt wie die linke Interarticularportion einen vollständigen Lastwechsel. Nur erfolgt am rechten Uncovertebralgelenk der Lastwechsel von der extensionsbedingten Dehnung zur Stauchung.

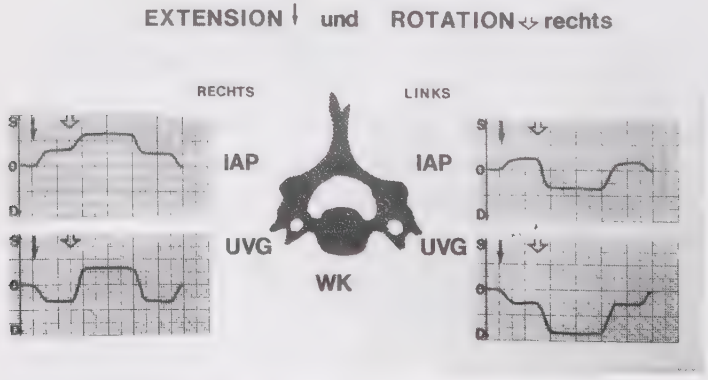

Abbildung 17: Das Belastungsmuster bei Extension und Rotation nach rechts

Die Wirbelkörper erfahren ebenfalls einen Lastwechsel, der jedoch nicht vollständig erfolgt. Auf die extensionsbedingte Dehnung pflanzt sich unter Rotation nach rechts eine Stauchung auf. Es bleibt aber absolut gesehen bei einer Dehnung.

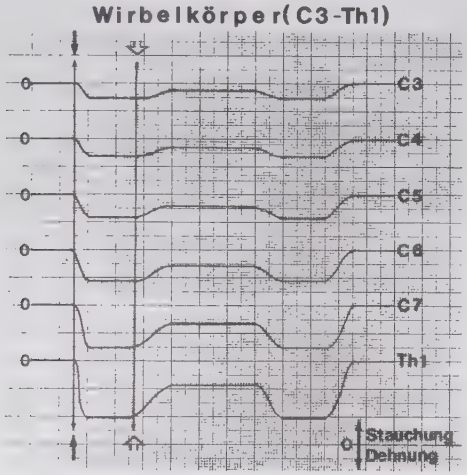

Abbildung 18: Die Belastung der Wirbelkörper unter Extension und Rotation nach rechts

Wie bei der Extension mit anschließender Rotation zeigt sich auch bei der Flexion mit folgender Rotation, daß die Belastungen durch die zusätzliche Rotation modifiziert werden:
An der rechten Interarticularportion und am linken Uncovertebralgelenk kommt es zum charakteristischen Lastwechsel und an der linken Interarticularportion und dem rechten Uncovertebralgelenk werden die vorbestehenden Belastungen verstärkt.

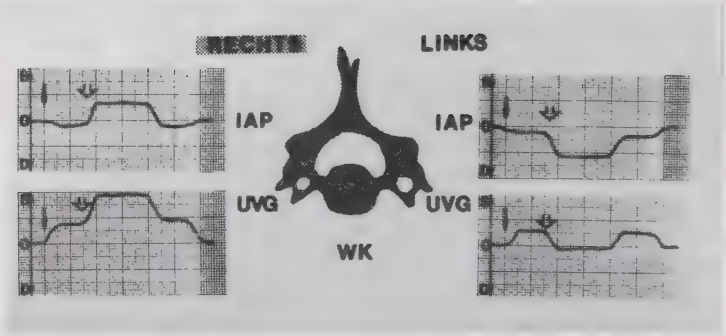

Abbildung 19: Das Belastungsmuster der Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke bei Flexion und Rotation nach rechts

An den Wirbelkörpern pflanzt sich wie bei der Extension die für die Rotation oder Seitneigung charakteristische Stauchung auf die vorbestehende Belastung - hier eine Stauchung - auf.

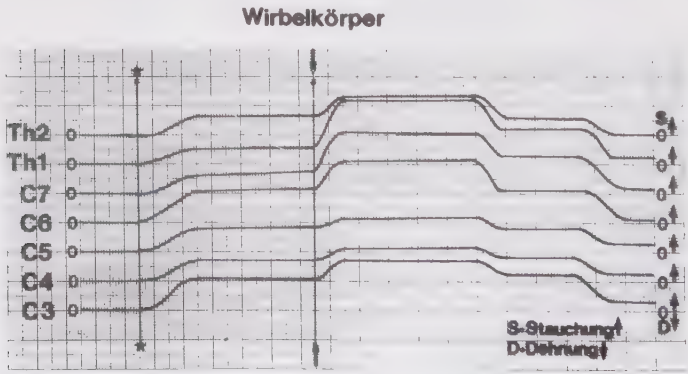

Abbildung 20: Die Belastung der Wirbelkörper bei Flexion und Rotation nach rechts

3.2.4. Messungen bei axialer Belastung

Entsprechend dem Kopfgewicht (GROH 1968) zeigen sich bei der axialen Belastung mit vier Kilopond verstärkte Längenänderungen vor allem an den Interarticularportionen, während sich an den Uncovertebralgelenken und den Wirbelkörpern nur eine relativ geringe Zunahme der vorbestehenden Belastungen ergibt.

So wird zum Beispiel der Kraftfluß an den Interarticularportionen bei der Rotation dahingehend modifiziert, daß beide Seiten eine Stauchung zeigen, die jedoch auf der konvexen Seite geringer ausfällt.

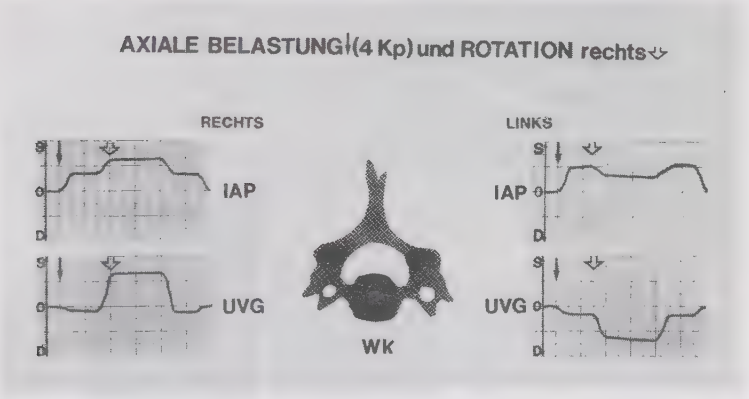

Abbildung 21: Unter axialer Belastung werden die Interarticularportionen gestaucht und die Uncovertebralgelenke gedehnt. Bei zusätzlicher Rotation nach rechts wird das Belastungsmuster charakteristisch verändert

3.2.5. Messungen im quantitativen, segmentalen Vergleich

Ein quantitativer Vergleich der gemessenen Kraftflüsse ist mit der DMS-Methode nur relativ und nicht absolut möglich.
Innerhalb der Segmente zeigt sich relativ gesehen immer, daß die Ausschläge - d.h. die Längenänderungen an den jeweiligen fünf DMS-Positionen - in einem bestimmten Verhältnis zueinander erfolgen. Die Wirbelkörpervorderflächen zeigen bei allen Funktionen dabei die stärksten Belastungen, es folgen die wesentlich geringer belasteten Uncovertebralverbindungen und schließlich die noch weniger belasteten Interarticularportionen.

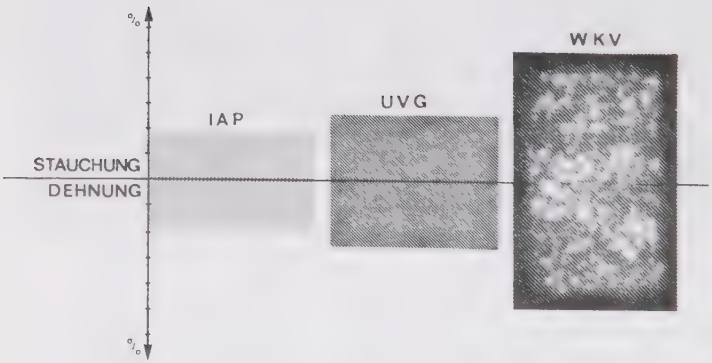

Abbildung 22: Relativer Vergleich der Belastungen an Wirbelkörper, Uncovertebralgelenken und Interarticularportionen

Im segmentalen Vergleich nehmen in cranio-caudaler Richtung die Meßwerte bei der verschiedenen Funktionen zu. Die höchsten Meßwerte zeigen sich an unteren und oberen Halswirbel.

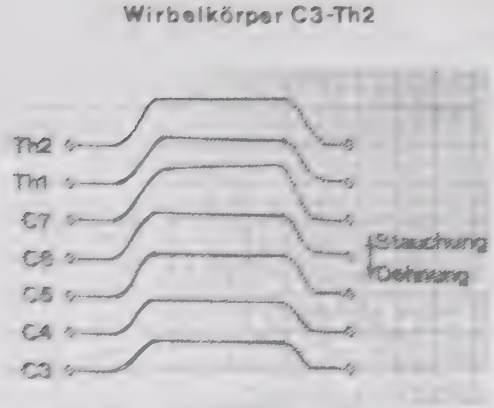

Abbildung 23: Deutlich zeigt sich bei den Halswirbeln, daß die maximalen Bewegungen an I_{12} und I_{23} registriert werden.

4. DISKUSSION

Die vorliegenden Untersuchungen mit und ohne axialer Belastung lassen Rückschlüsse auf die wechselnde knöcherne und ligamentäre Beanspruchung der Wirbelanteile unter funktionellen Bewegungen zu.

Bei Bewegungen in der Sagittalebene ist die Dehnung der Interarticularportionen während der Flexion bedingt durch die ligamentäre Verspannung der Wirbelbogenstrukturen.
Ohne den flexionshemmenden Einfluß der Bänder könnten die Gelenkflächen ungehindert distrahiert werden, und an den Interarticularportionen träte folglich keine Dehnung auf.
Stattdessen gleiten die Facetten in der Art übereinander, daß sich die unteren Gelenkflächen auf den oberen des nächsttieferen Wirbels nach vorne oben bewegen, und die Gelenkkapseln angespannt werden.
Nach Bewegungsstudien von FIELDING (1957) sind die Facetten bei maximaler Beugung subluxiert, was sich durch das dorsale Klaffen der Gelenkspalten äußert. Nach Untersuchungen von PENNING (1968) beträgt in dieser Situation die Kontaktfläche der Facetten nur ca. 5 mm. Dies verdeutlicht, wie schlecht die Wirbelkörper gegen ein Abscheren bei der Flexion durch die Wirbelbogengelenke gesichert sind.
Folglich kommt bei der Flexion den Processus uncinati eine sehr wichtige Funktion zu: Die seitlichen Hakenfortsätze wirken wie zwei Schienen, auf denen die nächsthöheren Wirbel während der Sagittalbewegungen geleitet werden und so gegen ein seitliches Abscheren gesichert sind. Dies kommt durch ihre Stauchung zum Ausdruck. Die Auffassung von SCHENK (1963), daß die Processus uncinati eine Barrierefunktion gegen ein seitliches Abgleiten der Wirbelkörper haben, kann damit im Sinne einer Schienenfunktion bestätigt werden.
Die Wirbelkörper werden entsprechend ihrer Tragefunktion gestaucht.

Die Tatsache, daß bei der Flexion die Wirbelkörper gestaucht und die Interarticularportionen gedehnt werden, belegt, daß bei der Flexion neben der Translatationsbewegung der Wirbel auch eine Rotation um eine quer zum Bewegungssegment gelegene Achse erfolgt, wie das auch RIZZI und COVELLI (1978) feststellten. Denn eine reine Translatationsbewegung würde an den Zwischengelenkstücken und den Wirbelkörpern eine gleichsinnige Belastung verursachen.

Bei der Extension kommt den Wirbelbogengelenken eine bewegungshemmende und vor allem mehr tragende Funktion zu. Dies wird durch die Stauchung der Interarticularportionen und natürlich auch durch den zunehmenden Gelenkschluß (FIELDING 1957) belegt.
Die Hakenfortsätze und vor allem die Wirbelkörper werden dagegen gedehnt, was für eine ligamentäre Beanspruchung spricht. Den Bändern - im wesentlichen dem Ligamentum longitudinale anterius - kommt folglich eine bewegungshemmende Funktion zu.

Die Belastungsmuster bei der Flexion und Extension zeigen das funktionelle Zusammenspiel der Wirbelstrukturen insbesondere von Wirbelbogengelenken und Hakenfortsätzen.
Die relativ großen Bewegungsausmaße der Halswirbelsäule sind offensichtlich deshalb möglich, weil neben der unterschiedlichen Stellung der Wirbelbogengelenke vor allem die spezifische Halswirbelstruktur "Processus uncinatus" eine bewegungsführende und -sichernde Funktion übernimmt.

Bei der Seitneigung weisen die Stauchungen der Interarticularportionen und Uncovertebralverbindungen der konkaven Seite darauf hin, daß hier eine knöcherne Abstützung erfolgt. Die Dehnungen der konvexseitigen Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke sind bedingt durch eine ligamentäre Beanspruchung.
Dieses Belastungsmuster läßt den Schluß zu, daß es sich hierbei um eine seitliche Kippungs- bzw. Rotationsbewegung der Wirbel handelt. BAKKE stellte 1931 fest, daß bei der Seitneigung der einzelne Wirbel insgesamt auf dem darunterliegenden zur konvexen Seite gleitet.

Dieses seitliche Kippungsverhalten bezeichnet EXNER (1954) als Torsion, da nach seiner Ansicht stets zur Seitneigung eine konkavseitige Rotation hinzukommt.
Die gleichsinnigen Längenänderungen bei der Seitneigung und bei der Rotation legen den Schluß nahe, daß für beide Bewegungen nur ein Bewegungszentrum existiert.
Die Bewegung des Dornfortsatzes zur konvexen Seite bei beiden Bewegungstypen untermauert diese Vermutung.
Das Bewegungszentrum bei der Seitneigung liegt nach LYSELL (1969) ventral der Gelenkfortsätze, wobei er sich auf die oben erwähnte Aussage von BAKKE stützt.
WHITE und PANJABI (1978) unterscheiden zwischen den Bewegungszentren für Rotation und für Seitneigung, wobei letzteres als unbekannt bezeichnet wird (siehe Abb. 4).

Bei den kombinierten Bewegungen der Horizontal- oder Frontalebene werden mit Hilfe der durchgeführten Messungen die komplexen Bewegungsabläufe deutlicher. Die sich vollständig ändernden Belastungen an den entsprechenden Interarticularportionen und Uncovertebralgelenken zeigen, daß ein Wechsel zwischen knöchernen und ligamentären Belastungen vorliegt. Bei der Flexion mit Rotation nach rechts zeigen sich zuerst die gewohnten Belastungsmuster: Dehnung der Interarticularportionen und Stauchung der Wirbelkörper und Uncovertebralfortsätze. Durch die zusätzliche Drehung nach rechts werden die konvexseitigen Interarticularportionen noch stärker gedehnt und die konkavseitigen Uncovertebralfortsätze noch stärker gestaucht. Folglich wird der in der Bewegungsrichtung liegende Hakenfortsatz sowohl bei der alleinigen Rotation oder Seitneigung als auch bei der kombinierten Bewegung gestaucht.
Dagegen zeigen die konkavseitigen Interarticularportionen und die konvexseitigen Uncovertebralfortsätze ein vollkommen anderes Verhalten. Die konkavseitigen Interarticularportionen erfahren einen vollständigen Lastwechsel. Auf die flexionsbedingte Vordehnung pflanzt sich eine Stauchung auf. Ebenfalls zeigen die konvexseitigen Hakenfortsätze einen vollständigen Lastwechsel von der Stauchung zur Dehnung, so daß die Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke der konkaven rechten Seite knöcherne und auf der konvexen Seite ligamentäre Beanspruchung zeigen.

Es liegt also letztlich das gleiche Belastungsmuster wie bei der reinen Rotation oder Seitneigung vor. Auf der konvexen Seite zeigen die Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke eine Dehnung, während auf der konkaven Seite Stauchungen vorliegen. Dies zeigt, daß die Rotation oder die Seitneigung für das Belastungsmuster der Halswirbelsäule bei komplexen Bewegungen von entscheidender Bedeutung sind.

Bei den axialen Belastungen wird deutlich, daß den Interarticularportionen auch eine tragende Funktion zufällt. Während ohne axiale Belastung bei der Rotation auf der konvexen Seite bedingt durch die rein ligamentäre Beanspruchung eine Dehnung vorliegt, zeigt sich bei axialer Belastung eine Stauchung, die geringer ausfällt als die auf der konkaven Seite.
Dies ist dadurch bedingt, daß zur Stauchung als Folge der axialen Belastung auf der konkaven Seite eine zusätzliche knöcherne Abstützung während der Rotation hinzukommt.

TONDURY (1968) bezeichnet die Wirbelbogengelenke als "Gelenke mit Führungs- und Hemmfunktion". Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse muß die "Tragefunktion" der Wirbelbogengelenke zu dieser Aussage ergänzt werden.

Interessant ist ein Vergleich von axialer Belastung mit Rotation nach rechts (Abb. 21) und der Extension mit Rotation nach rechts (Abb. 17): Die fast identischen Belastungsmuster sprechen für ein jetzt gleiches Bewegungszentrum der Rotation unter axialer Belastung und der Rotation unter Extension.

Beim quantitativen segmentalen Vergleich zeigt sich bei allen Wirbeln das gleiche Verhältnis der Belastungen: Die Wirbelkörper werden am stärksten belastet, während die Uncovertebralgelenke wesentlich geringer und die Interarticularportionen am geringsten belastet sind. Die hohe Belastung der Wirbelkörper zeigt, daß über den Wirbelkörper-Bandscheiben-Bänder-Verbund der hauptsächliche Kraftfluß erfolgt.
Somit kann indirekt die Aussage von BEDBROOK und EDIBAUM (1973) bestätigt werden, daß die Festigkeit der Bandscheibenhaft in Verbindung mit den Längsbändern für die Stabilität der Halswirbelsäule entscheidend ist.

Im intersegmentalen Vergleich ergeben sich immer zunehmende Belastungen in caudaler Richtung. Die höchsten Meßwerte werden regelmäßig am sechsten und siebten Halswirbel registriert. Diese Tatsache ist sicherlich dadurch wesentlich beeinflußt, daß die ligamentäre Verspannung am Übergang zur unbeweglicheren Brustwirbelsäule am stärksten ist, was sich mit der Aussage von LYSELL (1969) deckt, daß an der unteren Halswirbelsäule die Bewegungsausmaße - vor allem für die Rotation - von cranial nach caudal geringer werden.

In diesem Zusammenhang muß der Auffassung EXNERS (1954) widersprochen werden, daß für die häufig auftretenden Veränderungen des Segmentes $C_{5/6}$ statische Ursachen verantwortlich seien. Nach den vorliegenden Messungen ist das Segment $C_{6/7}$ wesentlich stärker statisch belastet als $C_{5/6}$. Damit ergibt sich indirekt ganz allgemein der Schluß, daß die funktionelle Beanspruchung für die Manifestation und Lokalisation der degenerativen Veränderungen innerhalb der einzelnen Segmente verantwortlich zu machen sind.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe dieser biomechanischen Untersuchungen von zwölf Kapsel-Band-Präparaten der menschlichen Halswirbelsäule können die wechselnde knöcherne und ligamentäre Beanspruchung sowie das funktionelle Zusammenspiel der charakteristischen Wirbelkörperstrukturen nachgewiesen werden.

Bei den Bewegungen in der Sagittalebene zeigt sich ein stets gleichmäßiges Belastungsmuster, bei Flexion und Extension werden spiegelbildliche Längenänderungen der Dehnungsmeßstreifen registriert.

Bei der Flexion werden die Wirbelkörper entsprechend ihrer hauptsächlichen Tragefunktion stark gestaucht. Die seitlich am Wirbelkörper aufragenden Hakenfortsätze wirken wie zwei Schienen bewegungsführend und bewegungssichernd gegen ein seitliches Abgleiten der Wirbelkörper. Sie werden dementsprechend gestaucht, jedoch nicht annähernd so stark wie die Wirbelkörpervorderflächen.
Die Interarticularportionen erfahren entsprechend der ligamentären Verspannung eine Dehnung, ohne die die Wirbelgelenke ungehindert distrahiert werden könnten. Die Dehnung ist Ausdruck der Bewegungshemmung durch die Bänder.

Schon alleine bei der Flexion läßt sich also das funktionelle Zusammenspiel von Wirbelkörper - mit seiner vornehmlichen Tragefunktion -, von Processus uncinati - mit der bewegungsführenden und -sichernden Funktion - und von den Wirbelbogengelenken - mit ihrer durch ligamentäre Verspannung bedingten Hemmfunktion - aufzeigen.
Die entgegengesetzten Belastungen von Wirbelkörpervorderflächen und Interarticularportionen verdeutlichen, daß bei der Flexion neben der Translatation der Halswirbel eine Rotation erfolgen muß.

Bei der Extension werden dagegen die Interarticularportionen gestaucht. Diese durch knöcherne Abstützung bedingte Stauchung zeigt ihre nun vorherrschende Tragefunktion.
Die Wirbelkörpervorderflächen und die Processus uncinati werden entsprechend ihrer ligamentären Beanspruchung gedehnt.

Die Dehnung zeigt, daß die Extension durch Strukturen an der ventralen Seite der Halswirbel gehemmt bzw. gebremst wird.

Die Bewegungen in der Horizontal- oder Frontalebene zeigen immer wieder das gleiche Belastungsmuster. So werden bei Seitneigung oder Rotation auf der konvexen Seite an den Interarticularportionen und Uncovertebralgelenken Stauchungen aufgrund der knöchernen Abstützung registriert.
Die konvexseitigen Interarticularportionen und Uncovertebralgelenke werden entsprechend ihrer durch ligamentäre Beanspruchung bedingten bewegungshemmenden Funktion gedehnt.
Die Wirbelkörper werden gestaucht, was Ausdruck ihrer überragenden Tragefunktion ist.
Offensichtlich erfolgen Rotation oder Seitneigung immer in Kombination miteinander, was als "Torsion" bezeichnet wird. Hierfür sprechen die gleichen Belastungsmuster und auch die Tatsache, daß der Dornfortsatz bei beiden Bewegungen jeweils zur konvexen Seite wandert.

Bei den kombinierten Bewegungen wird deutlich, daß die Rotation oder Seitneigung für das jeweilige Belastungsmuster einen hohen Stellenwert hat. Nach vorheriger Flexion oder Extension kommt es durch die Rotation letztendlich zu den gleichen Belastungsmustern wie bei der reinen Rotation oder Seitneigung.
Die Lastwechsel der konkavseitigen Interarticularportionen zeigen, daß es hier von der ligamentären Beanspruchung - Dehnung - zur knöchernen Abstützung - Stauchung - kommt.
Der zweite vollständige Lastwechsel erfolgt an den konvexseitigen Uncovertebralgelenken allerdings umgekehrt. Von der knöchernen Abstützung kommt es zur ligamentär bedingten Bewegungshemmung. Dieses Verhalten legt den Schluß nahe, daß es sich auch hierbei um eine torsionsartige Kippung handeln muß.

Die Bewegungen unter axialer Belastung zeigen, daß den Wirbelbogengelenken neben der bewegungsführenden und -hemmenden Funktion auch eine entsprechende Tragefunktion zukommt.

Die Wirbelbogengelenke lassen sich also nicht einfach als "Schlottergelenke" oder "straffe Wackelgelenke" bezeichnen, sondern sie müssen in den einzelnen Funktionen und ihren Belastungsmustern dargestellt und erläutert werden. Die Definition, daß die Wirbelbogengelenke Führungs-, Hemm- und Tragefunktion haben, wird dem am ehesten gerecht.

Die Rotation unter axialer Belastung zeigt ein gleiches Belastungsmuster wie bei der Extension mit Rotation nach rechts. Diese wiederholt überprüfte Erkenntnis weist darauf hin, daß offensichtlich gleiche Bewegungszentren bzw. -achsen vorliegen.

Der quantitative segmentale Vergleich verdeutlicht die unterschiedlichen Beanspruchungen von Wirbelkörper, Uncovertebralgelenken und Interarticularportionen. Immer werden die Wirbelkörper entsprechend ihrer hauptsächlichen Tragefunktion am stärksten beansprucht. Danach folgen die Processus uncinati und schließlich die Interarticularportionen mit der geringsten Belastung.

Im intersegmentalen Vergleich sind die höchsten Belastungen jeweils am sechsen und siebten Halswirbel zu beobachten. So weist das Segment $C_{6/7}$ eine höhere statische Belastung auf als das Segment $C_{5/6}$ in dem die degenerativen Veränderungen am frühesten und ausgeprägtesten in Erscheinung treten.
Folglich sind die funktionellen Belastungen und nicht die statischen in erster Linie für die Manifestation und Lokalisation der degenerativen Aufbraucherscheinungen verantwortlich zu machen.

6. LITERATURVERZEICHNIS

AUFDERMAUR, M.: Die Spondylosis cervicalis
Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, Bd. 17, Hippokrates, Stuttgart 1960

BÄRTSCHI-ROCHAIX, W.: Migraine cervicale
Huber, Bern, 1949

BAILEY, R.W.: Observations of cervical intervertebral disc lesions in fractures and silocations.
J. Bone Jt. Surg. 45-A (1963) 461

BAKKE, S.N.: Röntgenologische Beobachtungen über die Bewegungen der Wirbelsäule Acta radiol. Suppl. 13
Stockholm, 1931

BARDELEBEN, K.: Handbuch der Anatomie des Menschen
Fischer, Jena 1896

BEDBROOK, G.M.: Are cervical spine fractures ever unstable?
J. West Pac. Orthop. Assoc. 6 (1969) 7

BEDBROOK, G.M., R.C. EDIBAUM: The study of spinal deformity in traumatic spinal paralysis
Paraplegia 10 (1973) 321

BOWDEN, R.E.M.: Cervical spondylosis
Proc. Royal Soc. Med.
59 (1966) 1141

DITTMAR, O.: Die sagittal- und lateralflexorische Bewegung der menschlichen Wirbelsäule im Röntgenbild. Zur Mechanologie der Wirbelsäule.
Z. Anat. Entwickl. Gesch.
92 (1930) 644

DUUS, P.: Die Einengung der Foramina intervertebralia infolge degenerativer Wirbelsäulenprozesse als Ursache von neuralgischen Schmerzzuständen im Bereich des Schulter- und Beckengürtels sowie der Extremitäten.
Nervenarzt 19 (1948) 489

ECKLIN, U.: Die Altersveränderungen der Halswirbelsäule
Springer, Berlin 1960

EXNER, G.: Die Halswirbelsäule
Thieme Verlag, Stuttgart 1954

FENLIN, J.M.: Pathology of degenerative disease of the cervical spine
Orthop. Clin. North Am. 2 (1971) 37

FICK, R.: Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter besonderer Berücksichtigung der bewegenden Muskeln
Bd. 1-3; Fischer, Jena 1904-1911

FIELDING, J.W.: Cineroentgenography of the normal cervical spine
J. Bone Jt. Surg. 39-A (1957) 1280

FIELDING, J.W.: Normal and selected abnormal motion of the cervical spine from the second cervical vertebra to the seventh cervical vertebra based on cineroentgenography
J. Bone Jt. Surg 46-A (1964) 1779

GONTZ, E.: Die Erkrankungen der Zwischenwirbelgelenke
Arch. orthop. Unfall-Chir.
34 (1934) 22

HINZ, P., H. ERDMANN: Zur manuellen Untersuchung der Halswirbelsäule in der Gutachterpraxis
Z. Orthop. 104 (1967) 28

HOFFMANN, K.: Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Meßfehlern
HBM-Darmstadt 1978

HULT, L.: The Munkfors Investigation
A study of the frequency and causes of the stift neck-brachialgia and lumbago-sciatica syndromes
Acta Orthop. Scand. Suppl. XVI, 1954

JIROUT, J.: Motility of the cervical vertebrae in lateral flexion of the head and neck
Acta Radiolog. 13 (1972) 919

JUNGHANNS, H., H. FISCHER, I. SEIFERT: Nomenclatura columnae vertebralis
Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis
Bd. 75
Hippokrates-Verlag, Stuttgart 1977

JUNGHANNS, H.: Die Wirbelsäule in der Arbeitsmedizin
Teil I
Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis,
Bd. 78
Hippokrates-Verlag, Stuttgart 1979

JUNGHANNS, H.: Biomechanische und biochemische Probleme der Wirbelsäulenbelastung.
Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis.
Bd. 80
Hippokrates-Verlag, Stuttgart 1979

KELLER, G.: Die Hyperplasie der Gelenkfortsätze an der Wirbelsäule
Z. Orthop. 90 (1958) 470

LIECHTI, A.: Die Röntgendiagnostik der Wirbelsäule und ihre Grundlagen
2. Aufl.
Springer-Verlag, Wien, 1948

LYSELL, E.: Motion in the cervical spine
Acta orthop. Scand. (Suppl.)
123 (1969)

NIETHARD. F.U.: Die Form- und Funktionsproblematik des lumbosacralen Überganges
Habilitationsschrift,
Heidelberg 1978

PENNING, L.: Functional pathology of the cervical spine
Excerpta Medica Foundation
Amsterdam 1968

PERRY, J., V.L. NICKEL: Total cervical spine fusion for neck paralysis
J. Bone Jt. Surg. 41-A (1959) 37

REISCHAUER, F.: Untersuchungen über den lumbalen und cervikalen Bandscheibenvorfall
Thieme, Stuttgart 1949

RIZZI, M., B. COVELLI: Beitrag zur Bestimmung des inneren Gleichgewichtes der Wirbelsäule
(Der Drehpunkt als Momentanpol)
Z. Orthop. 114 (1976) 833

SCHANZ, A.: Zur Anatomie und Physiologie der Wirbelsäule
Z. Orthop. Chir. 55 (1931) 549

SCHENK, R.: Funktionelle Anatomie der Wirbelsäule
in: Die Funktionsstörungen der Wirbelsäule
Rheumatismus in Forschung und Praxis,
Bd. II
H. Huber, Bern, 1963

SCHMORL, G., H. JUNGHANNS: Die gesunde und kranke Wirbelsäule im Röntgenbild
1. Aufl.; Thieme Verlag, Leipzig 1932

SIMON, K.: Röntgendiagnostik der Wirbelsäule
Fischer-Verlag, 1951

STOFFT, E.: Der Bandapparat der Halswirbelsäule und seine funktionelle Bedeutung
Phys. Med. Rehab. 11 (1970) 133

TÖNDURY, G.: Zur Entwicklung funktioneller Strukturen im Bereich der Zwischenwirbelscheiben
Schweiz. med. Wschr. 77 (1947) 643

TÖNDURY, G.: Lehrbuch und Atlas der Anatomie der Menschen, Bd. 1, 20. Aufl.
in: Rauber-Kopsch
Thieme-Verlag, Stuttgart 1968

TROLARD, A.: Quelques articulations de la colonne vertebrale
Int. Monatsschr. f. Anat. u. Physiol. 10 (1893) 1

VIRCHOW, H.: Die sagittal-flexorische Bewegung der menschlichen Halswirbelsäule
Arch. orthop. Unfall-Chir. 26 (1928) 1

WHITE, A.A. III., M.M. PANJABI: Clinical biomechanics of the spine
Lippincott, Philadelphia, Toronto 1978

ZUKSCHWERDT, L., E. EMMINGER, F. BIEDERMANN, H. ZETTEL: Wirbelgelenk und Bandscheibe
2. Aufl., Hippokrates, Stuttgart 1960

Norbert Kiedrowski

Wuppertal, den 23. März 1981

LEBENSLAUF

Name	Norbert Kiedrowski
Wohnung	Kriemhildenstraße 5, 5600 Wuppertal-2
Geburtstag	19. Februar 1953
Geburtsort	Schwelm, Ennepe-Ruhr-Kreis
Glaubenszugehörigkeit	römisch-katholisch
Familenstand	ledig
Eltern	Paul Kiedrowski, technischer Fernmeldesekretär und Ehefrau Josefine, geborene Schrotz
Geschwister	zwei Schwestern, einen Bruder
Schulbildung	neun Jahre Besuch der katholischen Volksschule in Schwelm; zweijährige Berufsfachschule (Gewerbeschule), Abschlußprüfung mit Auszeichnung; Besuch der zehnten Klasse Fachoberschule; von 1973 bis 1975 Besuch des Friedrich-Spee-Kollegs in Neuss mit dem Abschluß der allgemeinen Hochschulreife
Berufsausbildung	verkürzte dreijährige Ausbildung in der Zeit von 1970 bis 1973 als Chemie-Laborant bei den Farbenfabriken Bayer AG in Wuppertal; Studium der Zahnheilkunde seit 1976 an der Universität Düsseldorf. Voraussichtlicher Abschluß im Herbst 1981.

Wuppertal, den 23. März 1981

Norbert Kiedrowski